

황토/폴리우레탄 복합담체를 충전한 Biofilter에서 기상 Styrene의 제거특성

강 경 호 · 감 상 규 · 이 택 관^{*} · 임 상 빈^{**} · 이 민 규^{***}
제주대학교 토목환경공학전공, ^{*}홍산환경건설(주),
^{**}제주대학교 식품생명공학과, ^{***}부경대학교 응용화학공학부
(2005년 10월 27일 접수; 2005년 11월 26일 채택)

Removal Characteristics of Styrene Vapor in the Biofilter Packed with Loess/Polyurethane Composite Media

Kyung-Ho Kang, Sang-Kyu Kam, Taek-Kwan Lee^{*}, Sang-Bin Lim^{**} and Min-Gyu Lee^{***}

Division of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

^{}Hungsan Environmental Construction Company, Jeju 690-022, Korea*

*^{**}Department of Food Bioengineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea*

*^{***}Division of Applied Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea*

(Manuscript received 27 October, 2005; accepted 26 November, 2005)

The treatment of styrene vapor was carried out using the biofilter packed with loess/polyurethane composite during continuous operation of 74 days. The microorganisms were adapted within 2-3 days under the experimental conditions of inlet concentration and empty bed contact time (EBCT). At 200 sec of EBCT, the removal efficiency of styrene was 100% with 200 ppmv of inlet concentration, while 92% with 400 ppmv of inlet concentration. The biofilter showed the stable removal efficiencies of over 74 % under the EBCT range from 300 to 75 sec at the 150 ppmv of inlet styrene concentration. The maximum capacity of styrene removal for the biofilter packed with loess/polyurethane was 29 g/m³/hr. During continuous operation of 74 days, pH of the drain water changed slightly and the pressure drop through the biofilter column was below 45 mmH₂O/m.

Key Words : Loess, Polyurethane, Composite media, Biofilter, Styrene

1. 서 론

최근 다양한 산업활동에 의해 인위적으로 발생된 화학물질이 여러 형태로 대기로 방출되고 있는데, 이들 대부분이 휘발성 유기화합물(VOCs, volatile organic compounds)이다. VOCs는 비점이 100℃ 이하이고, 25℃에서 증기압이 1 mmHg보다 큰 물질을 말하는 것으로 대기중에서 이동성이 강하고 냄새를 유발할 뿐만 아니라, 마취성이 강하며¹⁾ 잠재적인 독성 및 발암성을 가지고 있어서 이들에 의한 환경오염 및 인간에 미치는 영향에 특별한 관심을 집중시

키고 있는 실정이다²⁾.

Styrene은 현재 환경 중에 널리 분포하고 있어 환경보건적으로 크게 우려되고 있는 VOCs 물질로서 해마다 수백만톤씩 생산되어 세계에서 생산되는 50개의 가장 큰 부피의 산업화학물질 중에 포함되어 있다^{3,4)}. Styrene은 주로 styrene 제조공장, 페인트 제조공장, 폴리스티렌 제조공장, 선박제조산업, 폐기물 사업장 등에서 발생하고, 또한 음식물 퇴비화 시설과 양돈농가의 분뇨의 부숙으로 인해 배출되기도 한다^{5,6)}. 이와 같이 다양한 배출원에서 환경중으로 배출되어지는 styrene은 고농도 증기로 폭로시 눈, 코, 호흡기 계통을 자극하고 신경계, 간, 폐, 신장 등에 영향을 미치며⁷⁾, 발암독성 및 배아독성 등^{8,9)}의 생식독성을 일으키는 것으로 보고되고 있으며 저농도에서도 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과

Corresponding Author : Min-Gyu Lee, Division of Applied
Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan
608-739, Korea
Phone: +82-51-620-1468
E-mail: mglee@pknu.ac.kr

혐오감을 유발한다. 이러한 이유로 styrene은 US EPA에 의해 우선적인 환경독성물질로 인용되고 있으며¹⁰⁾, 국내에서도 대기환경보전법 제3장 제30조의 악취물질에 포함되어 있다.

이러한 styrene과 같은 VOCs를 제거하는 기술로는 흡착제 등에 흡착하여 제거하는 물리적 방법과 소각처리방법 및 산 알칼리를 이용한 세정식 같은 화학적 방법이 많이 이용되고 있다. 그러나 기존의 물리화학적 처리방법은 고가이고 처리효율이 낮으며, 후처리가 필요한 2차 오염물질이 발생하는 단점을 지니고 있어 최근에는 저비용으로 운전할 수 있으며 2차 오염물질을 배출하지 않는 장점을 지닌 환경친화형 기술인 biofilter에 많은 관심이 집중되고 있고 이에 대한 연구도 많이 진행되고 있는 실정이다.^{11,12)}

Biofilter의 기본개념은 반응기내에 충전된 담체의 여재층에 오염된 기상물질이 통과될 때 담체에 부착된 미생물의 왕성한 활동에 의해 이를 산화 분해시키는 것으로¹³⁾, biofilter의 제거효율을 극대화하기 위해서는 담체의 선정이 중요하다. 담체가 갖추어야 할 조건으로는 영양염류, 수분함량, pH, 유기탄소량 등이 적절하여 미생물 성장을 위한 최적의 환경을 만들 수 있도록 넓은 비표면적을 가져야 하며, 장시간 사용시에도 압력손실이 적어야 하고, 또한 높은 수분함유와 공극을 그리고 낮은 부피밀도를 가져야 한다.¹⁴⁾

일반적으로 biofilter 충전 담체로는 compost, peat, wood chip, wood bark, 토양 등의 천연 유기성 담체가 널리 사용되고 있으나, 미생물에 의한 압력 손실이 증가하고 담체의 분해 또는 압착으로 인한 clogging이나 channeling 현상이 생겨 담체의 수명을 줄이는 등 문제점이 발견되었다.¹⁵⁾ 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 유기성 담체에 perlite, polyurethane, 세라믹 등과 같은 무기성 담체를 혼합하여 사용하는 등 새로운 담체의 개발에 많은 연구가 수행되고 있다.^{12,16)}

황토(loess)는 우수한 통기성과 습도조절능력을 가지고 있으며, 또한 탈취성능을 가지고 있어¹⁷⁾ biofilter 담체로서 활용될 수 있을 것으로 사료되나 이를 담체로 활용한 연구는 전무한 실정이다. 또한 polyurethane은 내구성과 내약품성, 기계적 강도가 좋고 높은 공극율과 높은 비표면적, 낮은 밀도 및 친수성을 갖고 있어¹⁸⁾ biofilter 담체로서 물리적 특성이 우수한 것으로 보고되고 있다.¹⁹⁾

Biofilter를 이용한 VOCs 처리에 관한 연구로는 benzene²⁰⁾, toluene^{21,22)}, xylene²³⁾ 및 BTEX²⁴⁾와 methanol²⁵⁾에 관한 연구 등과 같이 다양한 VOCs 물질에 대해 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나

이에 반해 biofilter를 이용한 styrene에 관한 연구로는 compost²⁶⁾ 및 peat 담체¹¹⁾를 충전한 biofilter를 이용한 styrene의 제거 특성에 관한 연구 등으로 전 세계적으로 기상 styrene에 관한 연구는 매우 미미한 실정이고, 또한 기상 styrene에 관한 기존 연구에서는 주로 compost 및 peat 등의 천연 유기성 담체를 사용하여 연구가 수행되었다.

따라서 본 연구에서는 새로운 형태의 담체, 즉 biofilter 충전 담체로서 활용 가능성이 있는 황토에 물리적 특성이 우수한 폴리우레탄(polyurethane)을 접목하여 황토/폴리우레탄 복합담체를 개발하고, 이를 biofilter에 충전하여 기상 styrene의 제거 특성을 검토하였다. 운전인자로서 기상 styrene의 유입농도, 유입유량의 변화에 따른 제거효율 및 제거용량을 산정하였고, 운전 중 biofilter 칼럼내의 압력손실과 pH 변화를 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 장치의 모식도에서 보여 지는 것처럼 biofilter, styrene 기화장치, 혼합기(mixing chamber) 및 nutrient supply pump 등으로 구성되어 있다. 기화된 styrene 가스는 혼합기에서 일정량의 공기와 혼합되어 biofilter 내로 유입되도록 하였다. Biofilter는 내경 5 cm, 높이 75 cm의 원형아크릴관을 이용하여 제작하였고, 총 부피 1.35 L 중 1 L의 부피에 복합담체를 충전하였다. 반응기는 기본적으로 상부로 유입되어 하부로 유출되는

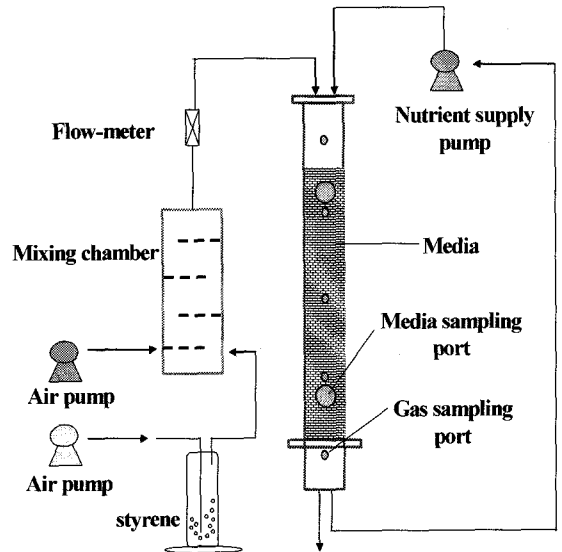


Fig. 1. Schematic diagram of biofilter system used in this study.

하향식을 채택하였으며, 충전 깊이별 가스 시료채취와 담체 시료채취를 위한 시료채취구를 설치하였다. 혼합기는 air pump에서 공급되는 공기와 styrene 기화장치에서 기화된 styrene 가스를 일정 유량비로 혼합함으로써 운전 에 필요한 농도의 오염물질을 반응기로 유입되게 하였으며(styrene의 농도는 biofilter 운전 전과 운전 시에 시료를 채취하여 이의 농도를 측정하여 확인하였음), biofilter를 운전하는 동안 수분 및 영양물질은 nutrient supply pump를 이용하여 공급하였다.

2.2. 실험재료

Biofilter의 충전 담체는 200 mesh 정도의 분말황토를 폴리우레탄으로 처리하여 제조한 황토/폴리우레탄(loess/polyurethane) 복합 담체를 사용하였으며, 체분리하여 5-7 mm인 크기의 입경을 가지는 것을 선별하여 1 L의 부피로 반응기에 충전하여 사용하였고, 충전된 복합 담체의 밀도, 공극율, 함수율 등의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 충전된 복합담체는 반응기 내에 고정되어 미생물을 부착 성장시키게 되는데, 본 실험에서 사용한 미생물은 하수처리장에서 반송슬러지를 채취하여 사용하였으며, 정량펌프를 이용하여 일정시간 동안 biofilter의 담체에 순환시키면서 접종을 하였다. 이렇게 담체에 접종된 미생물은 운전 기간 동안 nutrient supply pump에 의해 영양물질을 공급받게 되며, 영양물질은 Table 2와 같은 조성으로 조제하였으며, 이를 100배로 희석하여 사용하였다.

Table 1. Physical properties of loess/polyurethane composite media

Physical characteristic	Values
Apparent density (g/cm ³)	1.42
Packing density (g/cm ³)	0.72
Void volume ratio	0.52
Water holding capacity, %(w/w)	48.73
Mesh size, mm	5~7

Table 2. Composition of the nutrient solution

Components	Concentration (g/L)
KH ₂ PO ₄	2.5
K ₂ HPO ₄	2.5
NH ₄ Cl	2.5
MgSO ₄ · 7H ₂ O	6.8
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.5
FeSO ₄ · 7H ₂ O	0.3
KNO ₃	1.5

2.3. 시료의 분석

가스 시료는 시료 채취구에서 gas-tight syringe를 이용하여 채취하였고, 채취한 시료 중의 styrene 농도는 gas chromatograph (Hewlett Packed, HP 5890 series II, U.S.A)에 의하여 HP-5 capillary column (crosslinked methylsilicone gum, 30 m × 0.32 mm ID × 0.88 μm film thickness)으로 분리하여 불꽃이온화검출기(FID)로 검출하였다. 기기 분석 시 온도는 등온으로 하였으며 주입구 온도는 70℃, oven 온도는 150℃, detector 온도는 250℃에서 정량하였다. 그리고 압력손실은 마노미터(Dwyer Instrument, MM. 400)을 이용하여 측정하였으며, 반응기로부터 배출되어 나오는 드레인수 중의 pH는 pH Meter(Orion, 420A)을 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Biofilter 예비 운전

Biofilter 운전에서 오염된 기체는 충전물 층을 통과하는 동안에 미생물의 왕성한 활동에 의해 산화·분해가 되는데, 이처럼 미생물에 의한 오염물질의 제거는 biofilter에 유입되어지는 오염물질의 제거율을 보거나 미생물에 의해 산화·분해되어 나온 생성물을 확인해보는 방법 등으로 알 수 있다²⁷⁾. 또한 담체에 미생물을 접종시키지 않고 담체 자체의 흡수 및 흡착 현상을 살펴봄으로써 미생물에 의한 오염물질의 제거 특성을 간접적으로 설명할 수 있으리라 판단된다. 이에 본 연구에서는 담체에 미생물을 접종하지 않고 반응기에 황토/폴리우레탄 복합담체를 1 L의 부피로 충전한 상태에서 수분 공급의 유·무에 따른 비교 실험을 통하여 담체 자체의 기상 styrene에 대한 흡수 및 흡착에 대한 예비운전을 하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

예비 운전은 styrene의 유입농도를 50 ppmv으로 고정하여 12시간 동안 1시간 간격으로 유출되는 styrene의 농도를 분석하였는데, Fig. 2에서 보듯이 수분을 공급하지 않은 경우, 초기 1-2시간 동안 styrene의 유출 농도가 40-43 ppmv을 나타내어 평균 17% 정도의 제거율을 보였고, 운전 3시간 이후부터는 유입되는 styrene이 거의 제거되지 못하였다. 이는 담체만을 충전한 상태에서는 초기 1-2시간까지는 담체 자체의 흡착 성능에 의해 어느 정도의 흡착이 이루어지지만, 그 이상의 운전 시간에서는 담체의 흡착 부위가 포화되어 거의 흡착이 일어나지 않아 황토/폴리우레탄 복합 담체만으로는 유입되어지는 기상 styrene를 제거하지 못함을 나타낸 것이다. 수분을 공급한 경우, 유입되어지는 styrene에 대해 초기 1-4시간 동안 유출 농도가 30-36 ppmv

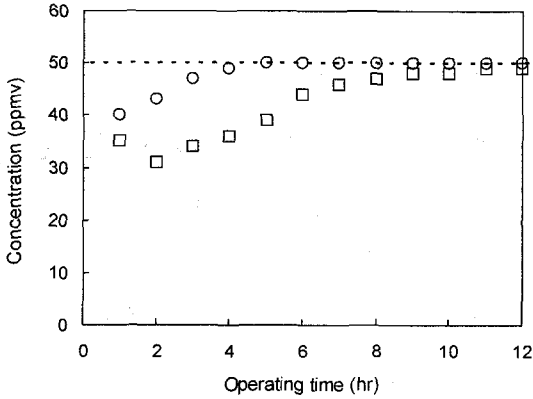


Fig. 2. Changes in outlet styrene concentration with the operation time in the biofilter column packed with loess/polyurethane. The microorganisms were not inoculated (moisture was supplied: □, moisture was not supplied: ○, inlet styrene concentration: 50 ppmv).

으로 나타나 평균 34%의 제거율을 보여 수분을 공급하지 않은 경우보다도 높은 제거율을 보였다. 이러한 결과는 흡착에만 의존한 제거보다는 수분에 의한 흡수작용이 동시에 일어나는 흡수/흡착에 의한 작용이 제거 효율적으로 우수함을 보여준 것이나 수분을 공급하여 운전한 결과 역시 운전 6시간 이후에는 styrene를 거의 제거하지 못하는 것으로 나타나 황토/폴리우레탄 복합 담체만으로는 계속적으로 유입되는 styrene의 제거가 어렵다는 것을 알 수 있었다.

3.2. Styrene의 유입농도 및 EBCT 변화에 따른 제거 특성

본 연구에서는 biofilter 운전에 의해 styrene 제거능을 살펴보기 위하여 biofilter내에 충전된 황토/폴리우레탄 복합 담체에 미생물을 부착 성장시켜 운전하였다. 미생물은 하수처리장의 반송슬러지를 사용하였으며, 정량펌프를 이용하여 일정기간 동안 biofilter내로 슬러지를 순환시켜 biofilter내에 충전된 황토/폴리우레탄 복합 담체에 미생물을 접종하였다.

Fig. 3은 기상 styrene의 유입농도 변화에 따른 제거 특성을 나타낸 것으로, 초기 biofilter 운전은 EBCT (empty bed contact time, 반응기 충전부피를 유량으로 나눈 공담접촉시간으로 반응기내에서 가스의 체류시간을 나타냄²⁸⁾)를 200 sec로 고정하여 styrene 가스의 유입농도를 50-400 ppmv로 단계적으로 증가시켰으며, 운전 37일부터는 EBCT를 120 sec로 낮추고 styrene의 유입농도를 50-200 ppmv, 운전 57일부터는 EBCT를 60 sec로 고정하여 50-150 ppmv의 styrene의 유입농도를 공급하여

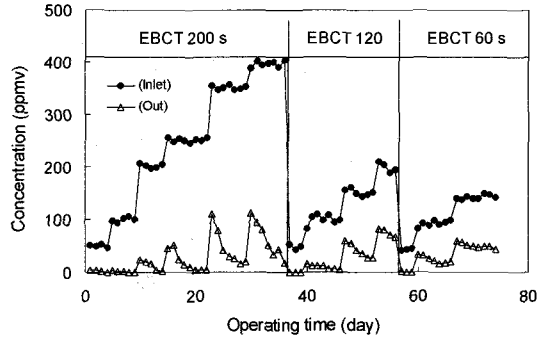


Fig. 3. Inlet and outlet styrene concentration profiles at different EBCT (empty bed contact time) during the continuous operation.

운전하였다. 그 결과 EBCT 200 sec에서 초기 미생물의 순응 및 활성을 위하여 styrene의 유입농도를 50 ppmv으로 공급하였을 때 운전 1일에 styrene의 제거효율이 91%로 높게 나타나 초기의 미생물 순응이 상당히 빠르게 이루어짐을 알 수 있었다. 미생물이 styrene의 기질에 대한 순응이 일어난 3일 이후부터 유입농도를 100, 150, 200 ppmv까지 단계적으로 높였을 경우, 각 유입농도에 대한 초기 제거효율이 90% 이상, 그리고 최대 제거효율이 100%로 나타나 안정적인 제거효율을 보였다. 그 후 계속해서 styrene의 유입농도를 단계적으로 높인 결과, 250, 350, 400 ppmv의 styrene에 유입농도 변화에 대해 초기 제거효율이 각각 80%, 70% 및 69%로 나타나 유입농도가 증가함에 따라 초기 제거효율이 감소하지만, 각 유입농도에 대한 최대 제거효율이 각각 99%, 94% 및 92%를 보여 수일 내 제거능이 회복됨으로써 고농도의 styrene의 유입에도 안정적으로 처리할 수 있음을 보였다.

EBCT 변화에 따른 기상 styrene의 제거 특성을 알아보기 위해 styrene의 유입농도를 150 ppmv으로 고정하고 EBCT를 300, 200, 120, 100 및 75 sec까지 감소시키면서 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 결과에서 보듯이 EBCT가 길어질수록 바이오필터의 효율은 증가를 하였으며, EBCT가 200 sec이상에서는 150 ppmv의 styrene에 대해 100%의 안정적인 제거효율을 보였다. 이는 EBCT가 길어질수록 담체에 부착 성장하고 있는 미생물과 styrene 간의 접촉시간이 길어짐에 따라 styrene의 분해가 원활히 일어나기 때문으로 사료된다. 반면 EBCT의 감소는 biofilter에 유입되는 styrene의 유입부하 및 유입유량이 증가하는 것을 의미하는데, EBCT를 200 sec에서 120 sec로 낮춘 경우 styrene의 유입농도 150 ppmv에 대해 최대 81%의 제거효율을 보였

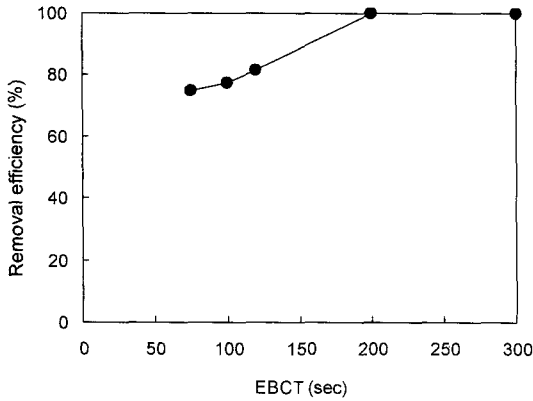


Fig. 4. Removal efficiencies of styrene with different EBCT (inlet styrene concentration: 150 ppmv).

고, EBCT를 100 sec 및 75 sec로 더욱 낮추었을 경우에는 각각 최대 제거효율이 78 및 74%로 제거능이 감소하였다. 이와 같이 EBCT를 낮춤에 따라 제거효율이 감소하는 것은 유입유량의 증가로 인해 styrene이 담체로 확산되어 분해되기 전에 배출되거나 미생물과 styrene 가스간의 접촉시간이 짧아짐에 따라 styrene이 충분히 분해되지 못하기 때문으로 사료된다.

3.3. 최대 제거 용량

최대 제거용량은 시스템의 운전 조건 및 충전재의 종류에 따라 달라지며, 실제 시스템의 설계 및 핵심적인 역할을 수행함은 물론 동일 조건의 biofilter의 성능을 알아보기 위한 필수적인 요소이기 때문에 biofilter 설계시 고려해야 할 중요한 변수이다.

Fig. 5는 황토/폴리우레탄 복합담체를 충전한 biofilter에서 styrene의 최대 제거용량을 산정하기 위하여 EBCT(200, 120, 60 sec) 및 유입 부하량에 따

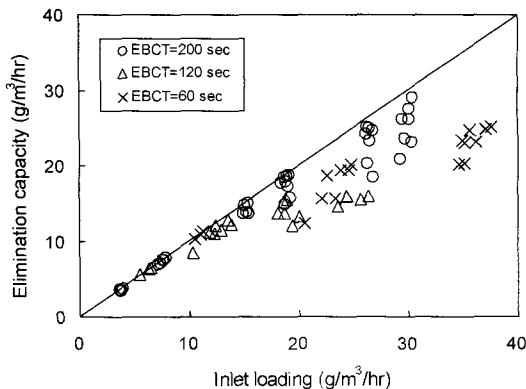


Fig. 5. Relationships between inlet loading and elimination capacity with different EBCT.

른 제거용량의 변화를 살펴본 결과이다. 그림에서 보듯이 EBCT가 200 sec 일 때, styrene의 유입부하량과 제거용량간의 관계를 살펴보면, 제거효율을 100%로 유지할 수 있는 최대 제거용량은 19 g/m³/hr로 산정되었다. 또한 EBCT가 120, 60 sec 일 때는 각각 6, 11 g/m³/hr의 값을 얻었다. 그리고 EBCT가 200 sec 일 경우 styrene의 유입부하량이 30 g/m³/hr 이상이 되면 제거용량의 한계값에 도달하게 되는데, 그때의 제거용량은 29 g/m³/hr로 나타났다. 즉 본 연구에서 황토/폴리우레탄 복합담체를 충전한 biofilter에서 EBCT가 200 sec 일 때 최대 제거용량은 29 g/m³/hr로 산정되었다. 이러한 결과를 타 연구자들의 결과와 비교해보면, Arnold 등²⁹⁾의 연구에서는 peat를 충전한 바이오필터에서의 styrene의 최대 제거용량이 30 g/m³/hr로 나타나 본 연구에서의 결과와 비슷한 제거용량을 보였는데, styrene 제거를 위한 상업용 biofilter의 경우 대부분 EBCT가 약 50-150 sec로 운전되고 있음을 감안할 때 본 연구결과로부터 EBCT를 60 sec까지 감소시키더라도 제거용량이 25 g/m³/hr에 달하였다.

3.4. pH 및 압력손실

Fig. 6은 biofilter를 운전하는 동안 배출되는 drain의 pH를 측정된 결과이다. 대부분의 미생물은 적정 pH 범위가 있어 충전 담체의 pH 변화는 biofilter의 효율에 큰 영향을 미치는 운전인자로 알려져 있다. Biofilter를 연속 운전하는 경우에 일부 가스물질들은 생물학적인 분해에 의해 산이 생성되므로 장기간 운전 시 pH가 낮아지게 되어 미생물의 활성에 영향을 미치게 된다³⁰⁾. 본 연구에서는 그림에서 보여 지는 바와 같이 황토/폴리우레탄 복합담체를 충전한 biofilter에서의 pH 변화는 6.1-6.3으로 거의 일정하게 유지되었으며, biofilter를 운전하는

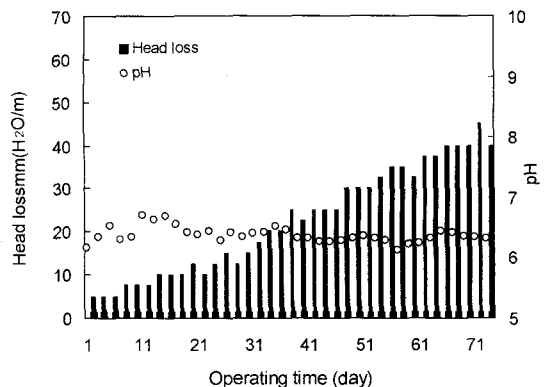


Fig. 6. Variations of head loss and pH during the continuous operation.

동안에 pH가 미생물의 활성이나 제거효율에 영향을 주지 않았다.

또한, Fig. 6에서 74일 간 biofilter를 운전하는 동안 biofilter 컬럼을 통한 압력손실을 살펴보면, 운전 시작 후 30일 까지는 15 mmH₂O/m로써 낮게 나타났으나 운전 65일 이후에서는 최고 45 mmH₂O/m까지 증가하였다. 이처럼 압력손실이 증가하는 이유는 장기간의 운전으로 많은 량의 styrene이 공급되면서 미생물이 이를 섭취하여 계속 성장하여 담체에 형성된 미생물막이 두꺼워지고 더불어 담체자체의 압축과 압력강하 현상이 발생되어 압력손실이 증가하는 것으로 생각된다. 일반적으로 biofilter를 운전함에 있어 처리능에 관계없는 한 압력손실을 낮게 유지하는 것이 전체 운전비용을 낮추는 방안이 될 수 있는데, Lee 등¹²⁾의 황토/폴리우레탄의 혼합담체를 사용한 연구에서 biofilter를 장기간 운전시 압력손실이 100 mmH₂O/m까지 증가된 것으로 보고되고 있어 이와 비교하여 본 연구에서는 낮은 압력손실로 biofilter가 운전됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

황토에 담체로서 물리적 특성이 우수한 폴리우레탄을 접목하여 황토/폴리우레탄 복합 담체를 개발하고 이를 biofilter에 충전하여 기상 styrene의 제거 특성을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) Styrene의 유입농도의 변화나 EBCT의 변화에 대한 미생물의 순응시간은 2-3일 정도로 나타났으며, EBCT를 200 sec로 유지하면서 styrene의 유입농도를 단계적으로 높였을 경우, 100%의 제거율을 보였으며, 400 ppmv에서도 92%의 높은 제거율을 보였다.
- 2) Styrene의 유입농도를 150 ppmv으로 고정하고 EBCT를 300 sec에서 75 sec까지 낮추어 styrene의 제거효율을 검토한 결과 74% 이상으로 비교적 높은 제거효율을 보임을 알 수 있었고, 황토/폴리우레탄 복합 담체를 충전한 biofilter에서의 styrene의 최대 제거용량은 29 g/m³/hr로 산정되었다.
- 3) Biofilter를 74일간 연속 운전하는 동안 황토/폴리우레탄 복합 담체를 충전한 biofilter에서의 pH는 거의 변화가 없었으며, 최대 압력손실은 45 mmH₂O/m로서 압력손실의 증가로 제거효율이 감소하거나 칼럼 내 담체의 막힘 현상은 발생하지 않았다.

감사의 글

이 논문은 제주지역환경기술개발센터 2004년도 연구비에 의해 지원되었으며, 이의 지원에 감사드립니다.

니다.

참 고 문 헌

- 1) Kim, I. H. and H. S. Choi, 2002, Engineering analysis of biofilter, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.*, 17(2), 115-120.
- 2) Makram, T. S., X. Zhu and B. C. Paik, 1996, Characteristics of trickle bed biofilter for treatment of VOC containing diethyl ether in waste gases, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 18(12), 1583-1596.
- 3) Smith, M. R., 1990, The biodegradation of aromatic hydrocarbons by bacteria, *Biodegradation*, 1, 191-206.
- 4) Zilli, M. and A. Converti, 1999, Biofilters, *In Flickinger, M.-C. and S. W. Drew (eds.), The Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation*, Wiley, New York, pp. 305-319.
- 5) Sollenberg, J., R. Bjurström, K. Wrangskog and O. Vesterberg, 1988, Biological exposure limits estimated from relations between occupational styrene exposure during a workweek and excretion of mandelic and phenylglyoxylic acids in urine, *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 60, 365-370.
- 6) 이택관, 이민규, 감상규, 허철구, 2004, 제주도 양돈장 분뇨의 액비화에 따른 유발 악취성분의 효율적인 처리기술개발, 제주지역환경기술개발센터 2004년도 연차보고서(04-4-40-44), 65pp.
- 7) Warhurst, A. M. and C. A. Fewson, 1994, Microbial metabolism and biotransformations of styrene, *J. Appl. Bacteriol.*, 77, 597-606.
- 8) Ragule, N., 1974, Embryotoxic action of styrene, *Gigiena i Sanitarii*, 11, 85-86.
- 9) Murray, F. J., J. A. John, M. F. Balmer and B. A. Schwetz, 1978, Teratologic evaluation of styrene given to rats and rabbits by inhalation or by gavage, *Toxicology*, 11, 335-343.
- 10) Zilli, M., E. Palazzi, L. Sene, A. Converti and M. D. Borghi, 2001, Toluene and styrene removal from air in biofilters, *Process Biochemistry*, 37, 423-429.
- 11) Yoon, I. K. and C. H. Park, 2002, Effects of gas flow rate, inlet concentration and temperature on biofiltration of volatile organic compounds in a peat-packed biofilter, *J. Biosci.*

- Bioeng., 93(2), 165-169.
- 12) Lee, M. G., P. J. Jun, D. H. Lee and S. K. Kam, 2003, Removal of toluene vapor in the biofilter packed with activated carbon/polyurethane composite media, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, 14(7), 864-868.
 - 13) Swanson, W. J. and C. L. Raymond, 1997, Biofiltration: fundamentals, design and operations principles, *J. Environ. Eng.*, 54, 538-546.
 - 14) Waren, J. S. and C. L. Raymond, 1997, Biofiltration: fundamentals, design and operations principles and applications, *J. Environ. Eng.*, 123(6), 538-546.
 - 15) Martin, H. A., S. Keuning and D. B. Janssen, 1998, Handbook on Biodegradation and Biological Treatment of Hazardous Organic Compounds (2nd ed.), Academic Press, Dordrecht, pp. 191-257.
 - 16) Shinabe, K., S. Oketani, T. Ochi, S. Kanchanatawee and M. Matsumura, 2000, Characteristics of hydrogen sulfide removal in a carrier-packed biological deodorization system, *Biochem. Eng. J.*, 5, 209-217.
 - 17) Kim, I. K., S. H. Seo and C. Y. Kang, 2000, General properties and ferric oxide content of hwangtoh(yellow ochre), *J. Kor. Pharm. Sci.*, 30(3), 219-222.
 - 18) Ergas, S. J., E. D. Schroeder and D. P. Chang, 1992, Biodegradation technology for volatile organic compound removal from air stream: Phase 1. Performance verification, California Air Resources Board, Final Report under Contract No. AO, pp. 32-137.
 - 19) Moe, W. M. and R. L. Irvine, 2000, Polyurethane foam medium for biofiltration. 1. Operation and performance, *J. Environ. Eng.*, 126(9), 815-825.
 - 20) Zhou, Q., Y. L. Huang, D. H. Tseng, H. Shim and S. T. Yang, 1998, A trickling fibrous-bed bioreactor for biofiltration of benzene in air, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 73, 359-368.
 - 21) Maria, E. A., P. Fermin, A. Richard and R. Sergio, Microbiological and kinetic aspects of a biofilter for the removal of toluene from waste gases, *Biotechnol. and Bioeng.*, 63(2), 175-184.
 - 22) Kiared, K., B. Fundenberger, R. Brzezinski, G. Viel and M. Heitz, Biofiltration of air polluted with toluene under steady-state conditions; experimental observations, *Ind. Eng. Chem. Res.* 36(4), 4719-4725.
 - 23) Jorio, H., L. Bibeau, G. Vie and M. Heitz, 2000, Effects of gas flow rate and inlet concentration on xylene vapors biofiltration performance, *Chem. Eng. J.*, 76, 209-221.
 - 24) Abumaizar, R., W. Kocher and E. H. Smith, 1998, Biofiltration of BTEX contaminated air streams using compost-activated carbon filter media, *J. Hazardous Materials*, 60, 111-126.
 - 25) Shareefdeen, Z., B. Baltzis, Y. S. Oh and R. Bartha, 1993, Biofiltration of methanol vapor, *Biotechnol. Bioeng.*, 41, 512-524.
 - 26) Ottengraf, S. P. P., J. J. P. Meesters, A. H. C. van den Oever and H. R. Rozema, 1986, Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biofilters, *Bioproc. Eng.*, 1, 61-69.
 - 27) Kam, S. K., K. H. Kang, J. K. Lim and M. G. Lee, 2004, Removal characteristics of H₂S in the biofilter packed with activated carbon/polyurethane composite media, *J. Environ. Sci.*, 13(1), 47-53.
 - 28) Warren, J. S. and C. L. Raymond, 1997, Biofiltration: Fundamentals, design and operations principles, and applications, *J. Environ. Eng.*, 123(6), 538-546.
 - 29) Arnold, M., A. Reittu, A. von Wright, P. J. Martikainen and M. I. Suihko, 1997, Bacterial degradation of styrene in waste gases using a peat filter, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 48, 738-744.
 - 30) Mueller, J. C., 1988, Biofiltration of gases—a mature technology for control of a wide range of air pollutants, British Columbia Res. Corp., Vancouver, B. C., Canada, pp. 1-22.